中京大学経済学論叢
11号
2000年 3月

道路混雑を内生化した都市鉄道の次善料金形成問題に対する理論的考察

鈴 木 崇 児

1 はじめに

Pucher and Lefevre (1996) が都市交通について多くの例を挙げて説明しているように、公共輸送を中心とする交通体系から自動車を中心とする交通体系への移行は、道路混雑の慢性化、温室効果ガス排出量の増加や公共輸送網の衰退を引き起こしており、長期的には市街地の分散化によって都心部を衰退させ、効率的なエネルギー消費を妨げる原因となっている。このため、都市鉄道に対して自動車利用から生じる外部不経済を抑制する代替交通機関としての役割が強く求められるようになってきた。このような役割に都市鉄道が十分に応えるためには、都市交通システムの全ての利用者が、それぞれの受益に応じて都市鉄道の整備費用を適切に負担する必要がある。しかしながら、多くの交通経済学の標準的なテキスト(例えば、奥野・篠原・金本 (1989)、植草 (1991)、齋藤 (1992))に見られるように、これまで鉄道整備の費用負担を論じる基礎となってきた伝統的な料金形成理論は、鉄道市場のみを単独で扱っており、鉄道整備費用を自動車利用者が享受する外部効果へと結びつけて検討した例は少ない。この問題に対し、金・林 (1995) は、鉄道と自動車交通部門への投資と需要量の関係を弾力性として仮定したマクロ的な分析によって、過去の投資水準及び費用負担と需要量の最適なバランスを次善価格形成の枠組で分析している。しかしながら、この研究では弾力性の背後にあるメカニズムが必ずしも明確ではないという問題がある。都市交通システムの全ての利用者の受益と費用負担を対応させるためには、サービス形態が異なる公共輸送機関と自動車のサービス供給費用と利用者の選択行動を交通システムの構造と伴に料金形成理論の枠組で包括的に扱う必要がある。

このため本論では、鉄道が果す自動車交通の外部不経済を抑制する役割を都市交通システムの中で位置付け、その整備費用の一部を自動車利用者が負担する異種交通機関間の費用負担調整を含む次善料金形成問題を扱う。具体的な都市交通ネットワークに対する料金形成の計算手法は、Miyagi and Suzuki（1996）、（1997）で非線形感度分析を応用した数値解析手法として検討した。本論では、単純なケースを設定し、比較静学の枠組で導出される道路混雑を内生化した都市鉄道に対する次善料金の政策含意と料金変更に対する調整メカニズムについて検討する。

2　ラムゼイ価格基準に基づく料金形成

Hotelling（1938）は、鉄道サービスのような規模の経済が働く複数サービスに対する料金形成について、各サービスに対する限界費用に等しく料金を設定し、それによって生じる費用の欠損部分を一括補助すれば、社会的総余剰が最大化されるという限界費用価格形成に補助を組み合わせた「最善（first best)」の枠組を示した。この料金形成では、欠損部分を補填するための補助財源を一括課税によって確保することを前提としていたが、現実問題としては補助財源の調達について困難がつきまとう。このため、限界費用価格形成によって賄われない欠損部分についても利用者費用負担を前提とする料金形成理論が検討された。その結果、限界費用価格から公平に乖離した価格をもって総費用の欠損部分を補填するラムゼイ価格基準に基づく「次善（second best)」の料金形成理論が提案された。もともと、ラムゼイ価格基準は、間接税を課すことによって発生するデッドウェイトロスを最小化する最適課税率の設定方法として Ramsey（1927）によって提案された。その後、Baumol and Bradford（1970）によって、都市鉄道のような市場独占状態にある費用逓減型の生産構造を持つ企業に対する次善価格形成問題に適用できることが示された。ラムゼイ価格基準は、Hotelling の方法が共通費配分の方法として一括補助方式を前提としていたのに対して、共通費配分についても限界的な利用者の支払意志を反映させることで効率的な費用負担を実現する経済学的整合性を備えた差別料金を導く基準である。

(1) ラムゼイ価格基準の導出

鉄道企業が複数のサービスを供給するものとする。このとき、ラムゼイ価格基準は（1）(2) 式の制約付き数理最適化問題を解くことによって導出される。

［P 1］

$$\max_{\mathbf{p}}.G(\mathbf{p},\mathbf{q}(\mathbf{p}))=CS(\mathbf{p},\mathbf{q}(\mathbf{p}))+PS(\mathbf{p},\mathbf{q}(\mathbf{p})) \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\quad PS(\mathbf{p},\mathbf{q}(\mathbf{p}))=0 \tag{2}$$

規制者の料金設定の目的関数は (1)式に示す社会的総余剰の最大化とする。CS と PS はそれぞれ消費者余剰と生産者余剰を表す。(2)式はゼロ利潤制約条件であり、鉄道企業に赤字が生じることを回避するための条件である。ここで、$\mathbf{p}$ は各サービスに対する料金を、$\mathbf{q}$ は各サービスの需要量をそれぞれ示すものとする。

サービス 1 からサービス m までの各料金 $\mathbf{p}=(p_1,\dots,p_m)$ を与件とし、需要の交差弾力性をゼロと仮定すると消費者余剰は線積分を用いて(3)式で表すことができる。

$$CS(\mathbf{p})=\sum_{i=1}^{m}\int_0^{q_i}\left(D^{-1}(s)-p_i\right)ds \tag{3}$$

ここで、$D^{-1}(q)$ は逆需要関数を表す。また、生産者余剰は、企業の料金収入から鉄道の運営費用 VC と建設費の償還費用 FC を減じて(4)式で定義される。

$$PS(\mathbf{p})=\sum_{i=1}^{m}p_i\,q_i(\mathbf{p})-\sum_{i=1}^{m}VC(q_i(p_i))-FC \tag{4}$$

［P 1］にラグランジュ未定乗数法を適用し、次善料金に対する必要条件(6)(7)式を導出する。λ はラグランジュ未定乗数を表す。

$$L(\mathbf{p},\mathbf{q}(\mathbf{p}),\lambda)=\sum_{i=1}^{m}\int_0^{q_i}\left(D^{-1}(s)-p_i\right)ds+\sum_{i=1}^{m}p_i\,q_i(p_i)-\sum_{i=1}^{m}VC(q_i(p_i))-FC$$

$$+\lambda\left(\sum_{i=1}^{m}p_i\,q_i(p_i)-\sum_{i=1}^{m}VC(q_i(p_i))-FC\right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda}=\sum_{i=1}^{m} p_i^{*} q_i(\mathbf{p}^*)-\sum_{i=1}^{m} VC(q_i(\mathbf{p}^*))-FC=0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_j}=\sum_{i=1}^{m} p_i(q_i)\frac{\partial p_i}{\partial p_j}-\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial VC(q_i(\mathbf{p}))}{\partial q_i}\frac{\partial q_i}{\partial p_j}$$

$$+\lambda\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial q_i}{\partial p_j}q_i(\mathbf{p})+\sum_{i=1}^{m} p_i\frac{\partial q_i(\mathbf{p})}{\partial p_j}-\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial VC(q_i(\mathbf{p}))}{\partial q_i}\frac{\partial q_i}{\partial p_j}\right)=0 \tag{7}$$

(7) 式を変形して(8)式を得る。

$$\sum_{i=1}^{m}\left(p_i-\frac{\partial VC(q_i(p_i))}{\partial q_i}\right)\frac{\partial q_i}{\partial p_j}=-\frac{\lambda}{1+\lambda}q_i(p_i) \tag{8}$$

ここで、交差弾力性がゼロであるとすると、$i \neq j$ のとき$\frac{\partial q_i}{\partial p_j}=0$であるので、(8)式は(9)式に示す交通機関 j についての条件のみで記述できる。

$$\left(p_j-\frac{\partial VC(q_j(p))}{\partial q_j}\right)\frac{\partial q_j}{\partial p_j}=-\frac{\lambda}{1+\lambda}q_j(\mathbf{p}) \tag{9}$$

ここで(10)式でラムゼイ定数を、(11)式で価格弾力性を、(12)式で限界費用を定義すると(13)式に示すラムゼイ価格設定基準が導出される。

$$R=-\frac{\lambda}{1+\lambda} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{ij}=\frac{\Delta q_j}{q_j}/\frac{\Delta p_i}{p_i} \tag{11}$$

$$\mathrm{MC}_i = \frac{\partial VC}{\partial q_i} \tag{12}$$

$$\frac{p_j - MC_j}{p_j} = \frac{R}{\varepsilon_{jj}} \tag{13}$$

(9)式、(13)式を合わせて以下の解釈が得られる。

＜ラムゼイ価格基準＞

ゼロ利潤制約を満足しつつ、社会総余剰を最大化するためには、各サービスの限界費用からの料金の乖離率を価格弾力性に反比例させるように料金を設定すればよい。

ラムゼイ価格基準の意味するところは、2種類のサービスを一つの企業が提供する場合には、図1に示すように、需要曲線の傾きが急なサービス、すなわち料金の変更に対して需要の変化が少ないサービスに対して相対的に高い料金を課せばよいというものである。

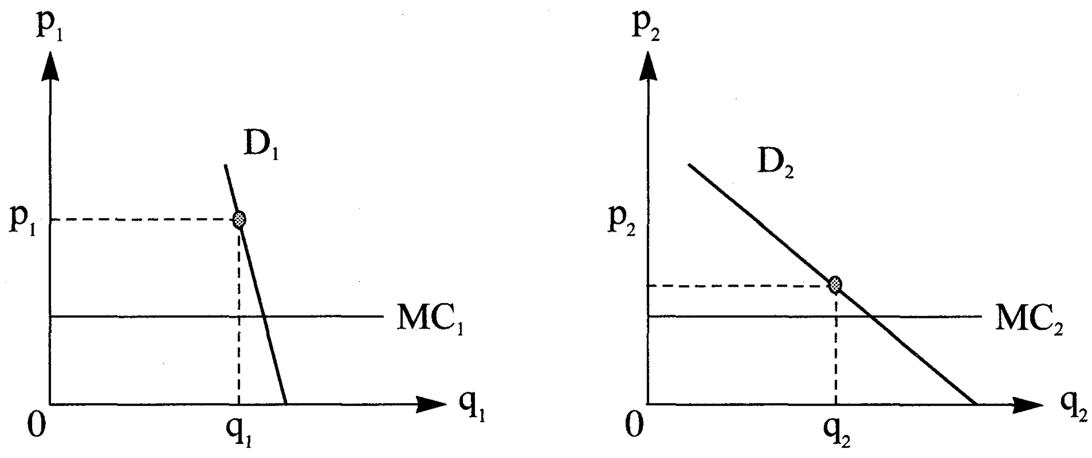

図1　ラムゼイ価格基準に基づく料金形成

(2) ラムゼイ価格基準の問題点

ラムゼイ価格基準を鉄道料金設定に適用する際の問題点として以下が指摘されている。

第1は、限界費用や需要の価格弾力性の概念は純粋理論の枠組では定義できても、現実には簡単に計測できないことであり、その意味でラムゼイ価格基準を実際の料金規制

に適用することには困難が伴う。

第２は、ラムゼイ価格基準を適用した料金設定は確かにある意味で「効率的」な規制となるが、必ずしも「公正」な規制にはならないことである。それは、ラムゼイ価格基準が、もともと限界費用価格からの乖離の基準を前提としたものであるため、サービスからの受益に応じてその費用を負担すべきであるという「応益原則」を満足しない可能性があるためである。例えば、Train（1977）はカルフォルニア州の高速鉄道Bartと既存のバスサービスの両方を供給する企業の料金設定にラムゼイ価格基準を適用した際に、バスサービスに相対的に高い料金が設定される計算結果を得たことを報告している。この理由はBartシステムは自動車を保有している高所得者がパークアンドライド等で利用している場合が多く、料金を値上げした場合にBartの利用者は、自動車のみを利用した通勤に切り替えることができるため、結果的に自動車サービスの価格弾力性が大きいのに対して、バスサービスの利用者は低所得者が多く、バス以外の代替的な交通手段を持つケースが少ないため、相対的にバスサービスの価格弾力性が小さいためである。この結果、ラムゼイ価格基準に従えば、高所得者が多いBartの利用者に相対的に低い料金を設定し、低所得者の多いバスサービスの利用者に相対的に高い料金を設定することになる。このような料金設定は効率性の観点からは合理的であっても、公平性の観点からは逆進的であり社会的に受け入れられにくい。

3　道路混雑現象を内生化した次善料金の導出

本章では、道路混雑現象を内生化した次善料金形成モデルを定式化し、この次善料金形成が内在的に持つ費用負担ルールとしての政策含意を検討するために、単純化した問題を比較静学の枠組で分析する。

異種交通機関の利用者間での費用負担調整を含む次善料金形成問題は、現行の次善料金形成理論の基礎となっているラムゼイ価格基準の導出過程と比較して次の４つの点で拡張されている必要がある。

１つ目は、鉄道と自動車を含む都市交通市場を対象とし、複数の交通機関の市場を同時に扱うために相互の需要の交差弾力性をゼロとする仮定を緩和する必要がある。本モデルでは、Dreze（1964）よって提案され、Train（1977）によって実際にバスと鉄道間の料金設定に適用された交差弾力性を考慮した次善価格形成モデルを自動車市場を含むモデルとして拡張する。

２つ目は、異種交通機関の利用者間での費用負担問題では、個々の交通機関の市場に対する料金形成と交通市場間での費用負担調整を同時に扱う必要があるため、市場調整手段が料金形成に対して整合的に組み込まれている必要がある。本研究では、鉄道と自動車利用者の費用負担を調整する手段として補助を考える。補助財源の調達方法として、その負担者のグループによって２つの方法を想定する。１つは、都市交通市場外部から外生的に交通企業に補助が与えられる場合であり、もう１つは当該都市交通市場内部の異種交通手段の利用、すなわち自動車利用に対して料金または税が課され、その収入が政府を介して補助される場合である。前者の方法が我が国では一般的であるが、後者の方法も都市モノレール等に適用されている。現実にも、鉄道企業に与えられる補助金は、企業経営の裁量以上に料金水準を大きく左右しており、鉄道整備費用の負担問題を考える上で補助財源の調達方法は、鉄道企業の経営の成否を決定付ける重要な要因となっている。

３つ目は、利用者の交通選択行動をモデル化する際に料金以外のサービス指標を組み込むことである。特に、鉄道と自動車の競合状態を適切に表現するためには、交通サービスに対する利用者負担の大きな部分を占めるサービスの品質を明示的に扱う必要がある。本モデルでは交通サービスの品質を表す代表的な要因として所要時間に着目し、利用者がサービスを消費するために要する時間に対する評価額を料金とともに各サービス消費に要する費用として一般化費用で定義し、次善料金形成理論の枠組に組み込む。

４つ目は、都市交通市場での鉄道と自動車との競合関係を鉄道整備費用負担問題の中で詳細に記述するために、鉄道料金の変更が道路混雑に及ぼす影響を内生化することである。本研究では、鉄道料金の変更と道路混雑の変化を交通ネットワーク均衡モデル（例えばFlorian and Spiess（1983)、宮城（1985)、交通ネットワークの均衡分析（1988)）で記述する。交通ネットワーク上での均衡状態は、交通利用者の選択行動と交通ネットワーク施設のパフォーマンスの釣り合いによって決定され、個々の交通利用者が日々体験する旅行費用をシグナルとして交通選択を行った結果、すべての利用者が自らの選択を変更する誘因を持たなくなる安定状態として記述される。交通ネットワーク均衡モデルを都市鉄道整備の費用負担問題の中に組み込むことは２つの点で有効である。１つは、鉄道料金の変更に対して利用者の交通手段変更を相殺するように作用する道路混雑の変化を各都市の具体的な交通条件を反映させて記述できること、もう１つは、その応用として鉄道整備によって生じる道路混雑緩和効果に応じて自動車利用者の費用負担を決定できることである。

多起点多終点間のフローを扱う一般の交通ネットワークを対象とする料金設定は、料金変更に対して利用者の交通選択行動を介して変化する変数が非常に多いため、解析的に分析することが困難であり、結果が得られたとしても複雑で分りにくい。そこで本分析では、図２に示すような１ＯＤペアを自動車(m=1)と鉄道(m=2)がそれぞれ1経路で結ぶ最も単純なネットワーク上での均衡モデルを制約とする次善料金形成問題を検討する。ここでは、簡単化のため利用者は全て自動車を所有し、どちらの交通機関も利用可能であると仮定し、旅行費用最小化規範に基づいて交通機関を選択するものとする。また、サービス供給のための可変費用は、鉄道のみで生じるものとし、固定費用は都市鉄道の整備費用を指すものとする。次善価格形成問題は[Ｐ２]のように定式化される。

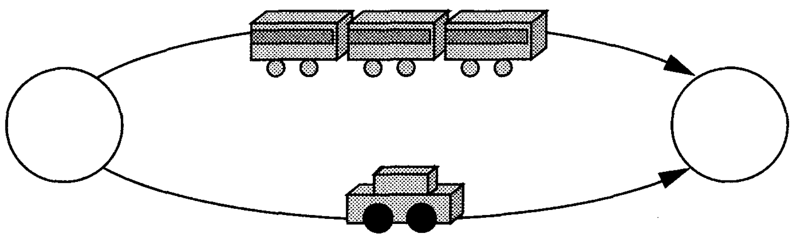

図２　例題のネットワーク

[Ｐ２]

$$Max.\,\Pi\left(\mathbf{p},\mathbf{z}^*\right)=\sum_{m\in 1,2}\left[\int_0^{q_m^*}\left(D_m^{-1}(s)-p_m\right)ds-\omega\, t_m^*(\mathbf{p})\,q_m^*(\mathbf{p})\right.$$
$$\left.-VC^*\left(q_2^*(\mathbf{p})\right)-FC\right] \tag{14-a}$$

$$s.t.\quad p_2 q_2^*(\mathbf{p})-VC^*\left(q_2^*(\mathbf{p})\right)-FC+G+W\geq 0 \tag{14-b}$$

$$W=p_1 q_1 \tag{14-c}$$

ここで、z^* （ C_1^*, C_2^*, q_1^*, q_2^*, t_1^*, t_2^*） は主問題の政策変数 $\mathbf{p}$ に対して(15-a～g)の均衡条件を同時に満たすネットワーク均衡状態の解とする。

$$-C_1+C_2=0 \tag{15-a}$$

$$C_1-p_1-\omega t_1=0 \tag{15-b}$$

$$C_2-p_2-\omega t_2=0 \tag{15-c}$$

$$q_1+q_2-Q=0 \tag{15-d}$$

$$t_1-f_1(q_1)=0 \tag{15-e}$$

$$t_2-f_2(q_2)=0 \tag{15-f}$$

$$p_1, p_2, C_1, C_2, q_1, q_2, t_1, t_2>0 \tag{15-g}$$

(14-a)式は、ラムゼイ価格基準の導出過程と同様に目的関数である都市交通システムに関わる経済主体の総余剰を最大化する規範を示している。t_m は交通機関 m の所要時間を表し、ω は時間価値を表すものとする。(14-b)式は、鉄道企業の収支均衡制約条件である。 G は中央政府からの補助金を表し、補助の財源調達については一括税が課されているものとする。この場合、税負担と補助は交通機関の全利用者の負担額と企業が与えられる補助額が等しいため、(14-a)式の中ではキャンセルアウトされる。W は(14-c)式に示すように自動車利用者が負担する料金収入を財源とする地方政府の補助を表す。

C_m は各交通機関の所要費用を表し、f_m は需要量と所要時間の物理的な関係を表すリンクパフォーマンス関数である。(15-d)は総交通量が一定 Q であることを示し、フロー保存条件式と呼ばれる。政府によって両方の交通機関の料金が設定されると交通利用者は、料金を与件として道路混雑を考慮して最適な交通機関を選択し、ネットワーク上で均衡状態を生じさせる。ネットワーク均衡条件式(15)をまとめて表記すると、次善価格形成問題は[Ｐ３]のように表現できる。

[Ｐ３]

$$Max.\,\Pi\,(\mathbf{p},\mathbf{z})=\sum_{m\in 1,2}\left[\int_0^{q_m}\left(D_m^{-1}(s)-p_m\right)ds-\omega\, t_m\, q_m-VC(q_2)-FC\right] \tag{16-a}$$

$$s.t.\quad \sum_{m\in 1,2}\left(p_m q_m-VC(q_2)-FC\right)+G\geq 0 \tag{16-b}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{p}, \mathbf{z}) = \mathbf{0} \tag{16-c}$$

$$\mathbf{p} > \mathbf{0},\ \mathbf{z} > \mathbf{0} \tag{16-d}$$

［Ｐ３］に対してラグランジュ関数を定義する。λ、μ はラグランジュ未定乗数を表す。

$$L(\mathbf{p}, \lambda, \mu) = \sum_{m \in 1,2} \left[\int_0^{q_m} \left(D_m^{-1}(s) - p_m \right) ds - \omega t_m q_m - VC(q_2) - FC \right] + \lambda \left[\sum_{m \in 1,2} \left(p_m q_m - VC_2(q_2) - FC_2 \right) + G \right] - \mu \mathbf{E}(\mathbf{p}, \mathbf{z}) \tag{17}$$

次善料金形成問題の最適解の必要条件は以下のように表すことができる。

$$\lambda \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0,\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \geq 0,\ \lambda \geq 0 \tag{18-a}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \tag{18-b}$$

$$p_i \frac{\partial L}{\partial p_i} = 0,\ \frac{\partial L}{\partial p_i} \leq 0,\ p_i \geq 0 \tag{18-c}$$

(18-a)式の条件について場合分けすると

$\lambda = 0,\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda} > 0$ のとき

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{m \in 1,2} \left(p_m q_m - VC(q_2) - FC \right) + G > 0 \tag{19-a}$$

(19-a)式が成立する場合、(16-b)式は有効制約になっていない。すなわち、都市鉄道に利潤が発生しているケースである。

$\lambda > 0, \dfrac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$ のとき

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{m \in 1,2} \left(p_m q_m - VC(q_2) - FC \right) + G = 0 \tag{19-b}$$

(19-b)式が成立する場合、(16-b)式の利潤制約が有効になっている。そして、λ は制約を緩和する、例えば、外生的に与えられている補助金 G を一単位増加させることによる社会的総余剰の限界的な増加を表している。

次に条件(18-b)式について解くと(20)式を得る。

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = 0 \text{ より } \mathbf{E}(\mathbf{p}, \mathbf{z}) = \mathbf{0} \tag{20}$$

(20)式は、交通管理者である政府が提示した料金変更に対して交通利用者が選択行動を調整し、交通ネットワーク上のフローを記述する各変数 $\mathbf{z}$ が変化し、均衡状態が成立していることを示す。μ は料金変更に対して均衡状態が調整されることによって生じる社会的総余剰の限界的な変化を表している。

次に条件(18-c)式については、

$p_i = 0, \dfrac{\partial L}{\partial p_i} < 0$ のとき

このときは、交通機関 i が利用されないケースであり、全ての交通利用者が他方の交通機関を利用しているケースである。

$p_i > 0,\ \dfrac{\partial L}{\partial p_i} = 0$ のとき

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = \sum_{m\in 1,2}\left\{(p_m + \omega t_m)\frac{\partial q_m}{\partial p_i} - \omega\left(\frac{\partial t_m}{\partial p_i}q_m + t_m\frac{\partial q_m}{\partial p_i}\right) - \frac{\partial VC(q_2)}{\partial q_2}\frac{\partial q_2}{\partial p_i}\right\}$$

$$+\lambda\sum_{m\in 1,2}\left(\frac{\partial p_m}{\partial p_i}q_m + p_m\frac{\partial q_m}{\partial p_i} - \frac{\partial VC(q_2)}{\partial q_2}\frac{\partial q_2}{\partial p_i}\right) - \mu\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial p_i} = 0 \qquad (21)$$

より、次善料金の条件式として（22）式が導出される。

$$\sum_{m\in 1,2}p_m\frac{\partial q_m}{\partial p_i} = \sum_{m\in 1,2}MC_2\frac{\partial q_2}{\partial p_i} - \frac{\lambda}{1+\lambda}q_i + \frac{\omega}{1+\lambda}\sum_{m\in 1,2}q_m\frac{\partial t_m}{\partial p_i}$$

$$+\frac{\mu}{1+\lambda}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial p_i} \qquad (22)$$

（22）式は、$\dfrac{\partial q_m}{\partial p_i} = 0\ :\ i \neq j,\ \dfrac{\partial t_m}{\partial p_i} = 0,\ \dfrac{\partial E}{\partial p_i} = 0$ すなわち、交差弾力性がゼロで、料金変更に対する所要時間の変化がなく、利用者の交通選択行動を考慮しない特殊ケースとしてラムゼイ価格基準を含んでいる。通常のラムゼイ価格基準との違いは以下のように整理できる。

①交通機関間での交差弾力性の存在を仮定しているために両交通機関の次善料金の条件が分離できない。すなわち自動車料金の値上げは公共輸送機関料金の値下げと類似した効果を利用者の選択を通して生じさせるため、次善料金は相対的な差として定義され連立方程式の解として求められる。

②右辺２項目までは、Dreze(1977) による交差弾力性があるケースの次善料金基準と同じものであり、基本的には次善料金の条件式は限界費用価格を基準として需要の価格弾力性が低いサービスにより多くの追加的な費用負担を求めるというルールを含んでいる。

③右辺３項は所要時間の価格弾力性についての次善料金の条件であり、需要の価格弾力性とは逆に所要時間の弾力性が高いサービスに追加的な費用負担を求めるルールを含んでいる。

④最後の第４項は、利用者の交通選択により交通ネットワーク均衡状態が維持されるために生じる各サービスの追加的な費用負担を含んでいる。ラグランジュ乗数ベクトル μ の符号は不定であり、第４項目の追加的な費用負担が正であるとは限らない。第４項目の符号が正ならば、利用者が自由な選択行動によって交通機関 i を利用することが社会的総余剰を減少させるために交通機関 i の料金を相対的に引き上げる働きをする。逆に交通機関 i の利用が社会的総余剰を増大させる場合には第４項は負の値をとり、料金を相対的に引き下げる働きをする。

なお、④の考察で論じた料金変更に対する交通利用者の選択行動の調整によって、均衡状態へ移行する交通ネットワーク上のフローの変化 $\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{p}}$ は、陰関数定理を使って以下のように計算できる。まず、均衡条件式を表すベクトル関数 $\mathbf{E}$ の料金に対する勾配は (23) 式のように分解することができる。

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{z}} \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{p}} \tag{23}$$

陰関数定理より(24)式が成立する。(24)式を用いて料金変更によって、特定の均衡状態から別の均衡状態へシフトする際の各変数の勾配が計算できる。

$$\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{E}^{-1}}{\partial \mathbf{z}} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}} \tag{24}$$

なお、図２の例では (24) 式の各項は以下のように計算される。まず、均衡条件式は式 (25) のように行列表現に対応する。

$$
\mathrm{E}\,(\mathbf{p},\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} -C_1 + C_2 \\ C_1 - \omega t_1 - p_1 \\ C_2 - \omega t_2 - p_2 \\ q_1 + q_2 - Q \\ -f_1(q_1) + t_1 \\ -f_2(q_2) + t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (25)
$$

（25）式に対して$\dfrac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}}$と$\dfrac{\partial \mathbf{E}^{-1}}{\partial \mathbf{z}}$を計算すると（26）、（27）式を得る。

$$
\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}} = \left[\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial p_1} \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial p_2} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (26)
$$

$$
\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{z}} = \begin{bmatrix}
\frac{\partial E_1}{\partial C_1} & \frac{\partial E_1}{\partial C_2} & \frac{\partial E_1}{\partial q_1} & \frac{\partial E_1}{\partial q_2} & \frac{\partial E_1}{\partial t_1} & \frac{\partial E_1}{\partial t_2} \\
\frac{\partial E_2}{\partial C_1} & \frac{\partial E_2}{\partial C_2} & \frac{\partial E_2}{\partial q_1} & \frac{\partial E_2}{\partial q_2} & \frac{\partial E_2}{\partial t_1} & \frac{\partial E_2}{\partial t_2} \\
\frac{\partial E_3}{\partial C_1} & \frac{\partial E_3}{\partial C_2} & \frac{\partial E_3}{\partial q_1} & \frac{\partial E_3}{\partial q_2} & \frac{\partial E_3}{\partial t_1} & \frac{\partial E_3}{\partial t_2} \\
\frac{\partial E_4}{\partial C_1} & \frac{\partial E_4}{\partial C_2} & \frac{\partial E_4}{\partial q_1} & \frac{\partial E_4}{\partial q_2} & \frac{\partial E_4}{\partial t_1} & \frac{\partial E_4}{\partial t_2} \\
\frac{\partial E_5}{\partial C_1} & \frac{\partial E_5}{\partial C_2} & \frac{\partial E_5}{\partial q_1} & \frac{\partial E_5}{\partial q_2} & \frac{\partial E_5}{\partial t_1} & \frac{\partial E_5}{\partial t_2} \\
\frac{\partial E_6}{\partial C_1} & \frac{\partial E_6}{\partial C_2} & \frac{\partial E_6}{\partial q_1} & \frac{\partial E_6}{\partial q_2} & \frac{\partial E_6}{\partial t_1} & \frac{\partial E_6}{\partial t_2}
\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
-1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & -\omega & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\omega \\
0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{\partial f_1}{\partial q_1} & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{\partial f_2}{\partial q_2} & 0 & 1
\end{bmatrix}
$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}^{-1}}{\partial \mathbf{z}} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2} \begin{bmatrix} -\tau_1 & \tau_2 & \tau_1 & \omega\tau_1\tau_2 & \omega\tau_2 & \omega\tau_1 \\ \tau_1 & \tau_2 & \tau_1 & \omega\tau_1\tau_2 & \omega\tau_2 & \omega\tau_1 \\ -\frac{1}{\omega} & -\frac{1}{\omega} & \frac{1}{\omega} & \tau_2 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\omega} & \frac{1}{\omega} & -\frac{1}{\omega} & \tau_1 & 1 & 1 \\ -\frac{\tau_1}{\omega} & -\frac{\tau_1}{\omega} & \frac{\tau_1}{\omega} & \tau_1\tau_2 & \tau_2 & \tau_1 \\ \frac{\tau_2}{\omega} & \frac{\tau_2}{\omega} & -\frac{\tau_2}{\omega} & \tau_1\tau_2 & \tau_2 & \tau_1 \end{bmatrix} \tag{27}$$

ここで $\tau_1 = \frac{\partial f_1}{\partial q_1}$, $\tau_2 = \frac{\partial f_2}{\partial q_2}$

(26)、(27) 式を (24) 式に代入すると、料金の変更に対して各利用者の交通選択行動の調整により、新たな交通ネットワーク均衡状態へ移行するときの交通ネットワーク上のフローの各変数の変化は(28)式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial p_1} & \frac{\partial C_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial C_2}{\partial p_1} & \frac{\partial C_2}{\partial p_2} \\ \frac{\partial q_1}{\partial p_1} & \frac{\partial q_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial q_2}{\partial p_1} & \frac{\partial q_2}{\partial p_2} \\ \frac{\partial t_1}{\partial p_1} & \frac{\partial t_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial t_2}{\partial p_1} & \frac{\partial t_2}{\partial p_2} \end{bmatrix} = \frac{\partial \mathbf{E}^{-1}}{\partial \mathbf{z}} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2} \begin{bmatrix} -\tau_2 & -\tau_1 \\ -\tau_2 & -\tau_1 \\ \frac{1}{\omega} & -\frac{1}{\omega} \\ -\frac{1}{\omega} & \frac{1}{\omega} \\ \frac{\tau_1}{\omega} & -\frac{\tau_1}{\omega} \\ -\frac{\tau_2}{\omega} & \frac{\tau_2}{\omega} \end{bmatrix} \tag{28}$$

図２に示した最も簡単な異種交通機関のネットワークと交通選択行動原理の組み合わせであっても、料金変更に対する交通ネットワーク均衡条件を表す各変数の勾配計算は煩雑になる。これらの変数の計算は、実規模の交通ネットワークを分析対象にした場合には、解析的に解くことが困難になるばかりでなく、ラグランジュ未定乗数法を適用して解析的に分析する利点の１つである次善料金に含まれる政策含意を交通ネットワークの性質やフローと関係づけて検討することができない。交通経済学において交通ネットワークを扱った研究が少ないのは、ネットワークの状態を表す変数が多くなるため、これらの変数の解釈が困難になることが原因の１つであろう。

4　おわりに

交通ネットワーク均衡モデルを次善料金形成問題と結合させることは、都市交通システムが存在する空間の概念を次善料金形成理論に持ちこむという観点から重要である。交通ネットワークは需要分布とその移動経路を人々の交通行動の規範と交通施設のパフォーマンスに対して整合的に表現することができ、本研究で扱った枠組は都市鉄道整備の具体的な代替路線の検討、路線延長や駅の配置といった工学的問題と整備費用、補助、料金政策といった経済的問題をリンクさせ、道路混雑問題や排出ガス抑制といった都市交通システム全般に及ぶ複合的な政策課題を具体的に検討するツールとして有効性を持っている。

次善価格形成理論を道路混雑を内生化するように拡張した本モデルがラムゼイ価格基準に基づく料金形成の場合と比較して異なっているのは以下の４点である。まず、交通機関間の交差弾力性を考慮していること、外生的に与えられる補助の方式の違いを組込んでいること、さらに、変数として料金と所要時間を含めた一般化費用を対象として次善価格が設定されること、そして、料金政策の変更に対する交通利用者の反応が、自動車交通の道路混雑現象に基づく交通ネットワーク均衡状態の変化として料金形成に内生化されていることである。

具体例からも明らかなように、料金の変更に対して利用者が交通行動を変化させるためには、厳密に言えば交通ネットワーク上のフローを記述する変数の変化を主問題にも反映させて解かなければ、自動車との競合状態を考慮したことにはならないことが分かる。また、補助の方式については、外生的に与えられる補助を増額した場合、都市交通システム内で部門間補助を実施した場合に関わらず、鉄道企業の収支均衡制約が緩和さ

れることによって料金水準が低下し、総余剰が単純に増加するだけでなく、利用者の選択行動の変更によって生じる交通ネットワーク上での均衡状態の変化を通じて交通費用が低下するため、自動車利用者にも所要時間の短縮効果が及ぶことが分かる。

［Ｐ２］を比較静学の枠組で解くことによって導出される自動車利用の外部性を考慮した都市鉄道の費用負担のルールは、交差弾力性の存在が仮定されているためにラムゼイ価格基準ほど解釈が容易なルールとして記述できないものの、各サービスの需要の価格弾力性に反比例するように料金設定を行うルールのほかに、混雑が変化し易い交通サービスに対してより高い料金を設定すればよいこと、さらに、料金決定の際に政府が仮定した各種の変数が利用者の行動によって撹乱されることを考慮して料金を設定をする必要があることを示した。

参考文献

Baumol, W. and Bradford, D.(1970):Optimal departures from marginal cost pricing, American Economic Review 72(1), pp.1-15.

Dreze, J.(1964):Some Postwar Contributions of French Economists to Theory and Public Policy, with Special Emphasis on Problem of Resource Allocation, American Economic Review, June, Vol.LIV, No.4, Supplement, Part 2.

Florian, M. and H.Spiess(1983):On binary mode choice/assignment models. Transpn. Sci. 17（1）, pp.32-47.

Hotelling, H.(1938):The General Welfare in Relation to Problems of Taxation and of Railway and utility Rates, Econometrica, Vol.6, pp.242-269.

Miyagi, T. and Suzuki, T.(1997):A Ramsey price equilibrium and its computational procedure. Journal of EASTS, Vol. 2,No.4, pp.1047-1062.

Miyagi, T. and Suzuki, T.(1996):A Ramsey price equilibrium model for urban transit systems: A bilevel programming approach with transportation network equilibrium constrains. 7th WCTR Proceeding 2, pp.65-78.

Pucher, J. and Lefevre, C.(1999):The Urban Transport Crisis in Europe and North America, Macmillan Press.

Ramsey, F. (1927):A contribution to the theory of taxation. Economic Journal, 37 (1), pp.47-61.

Train, K.E. (1977):Optimal transit prices under increasing returns to scale and a loss constraint, Journal of Transport Economics and Policy, 11 (2), pp.185-194.

植草益（1991）：公的規制の経済学、 筑摩書房、pp.114-117.

奥野正寛・篠原総一・金本良嗣（1989）：交通政策の経済学、 日本経済新聞社、pp.207-224.

金広文・林良嗣（1998）：自動車関係（諸）税収の都市鉄道への充当妥当性に関する一評価手法の構築と中京圏への適用、高速道路と自動車、第41巻、第7号、pp.23-31.

斉藤峻彦（1992）：交通市場政策の構造、中央経済社.

宮城俊彦（1985）：交通均衡モデル：理論と計算法、土木計画学研究・論文集、No2、pp.13-28.

土木計画学研究委員会編（1998）：交通ネットワークの均衡分析、土木学会.